



L'ottica adattiva ad Arcetri e il *Large Binocular Telescope*

The Arcetri Adaptive Optics group and the Large Binocular Telescope

Simone Esposito

INAF – Osservatorio Astrofisico di Arcetri

Riassunto. Questo contributo riassume la storia del gruppo di ottica adattiva di Arcetri a partire dalla visione di Franco Pacini e Piero Salinari alla fine degli anni '80 fino ad arrivare alla sua messa in pratica e al riconoscimento internazionale dei suoi risultati intorno al 2010.

Parole chiave. Alta risoluzione angolare, ottica adattiva, strumentazione astronomica.

Introduzione

Il gruppo di ottica adattiva dell'Osservatorio di Arcetri oggi conta una ventina di persone ed è impegnato in vari progetti di grande rilevanza sia nazionale che internazionale che coinvolgono molti telescopi della classe 8 metri e due dei tre telescopi detti Extremely Large Telescopes attualmente in fase di progettazione. Inoltre, il gruppo è considerato come uno dei gruppi principali nello scenario internazionale dell'ottica adattiva. Questo successo nasce dalla visione anticipatrice di alcune persone che hanno coinvolto la comunità astrofisica italiana, ed in particolare l'Osservatorio di Arcetri, nello sviluppo di tecnologie adattive per il grande telescopio Large Binocular Telescope (LBT).

Abstract. This contribution summarizes the history of the adaptive optics group at Arcetri from the vision of Franco Pacini and Piero Salinari at the end of the 1980s to its entry into operation and the international recognition of the achieved results in around 2010.

Keywords. High angular resolution, adaptive optics, astronomical instrumentation.

Introduction

The Adaptive Optics group of the Arcetri Observatory now has about 20 members and is involved in numerous large projects of national and international relevance using many 8m class telescopes and two out of three of the so-called Extremely Large Telescopes currently in the design phase. The group is considered as one of the reference groups in the international scenario of Adaptive Optics for Astronomy. This success stems from the vision of a few farsighted people that involved the Italian astrophysical community and particularly

Il progetto Columbus, poi LBT

È alla fine degli anni '80 che Franco Pacini, al tempo direttore dell'Osservatorio di Arcetri inizia una collaborazione con la University of Arizona (UoA) nella persona del Prof. R. Angel per lo studio di un telescopio interferometrico composto da due telescopi da 8m. Il primo schema di questo telescopio è mostrato in Fig. 1.

Il progetto, che prevede 4 telescopi (come il Very Large Telescope) viene poi semplificato e si concentra sulla realizzazione della sola unità di sinistra, quella con la montatura binoculare che renderà il telescopio unico al mondo. È da notare che anche questa unità verrà pensata sin dall'inizio come una unità interferometrica, quindi capace di ottenere risoluzioni angolari date dalla distanza massima fra i bordi degli specchi, pari in questo caso a 23m circa: stiamo parlando di risoluzioni nel visibile di 6 millisecondi d'arco (mas). Il suo nome è ancora Columbus ma poi cambierà in Large Binocular Telescope. Un disegno di questa seconda versione è visibile in Fig. 2.

Il telescopio è stato poi realizzato così. Una foto del 2008 (Fig. 2, a destra) che lo mostra, ancora privo di molti strumenti, dentro la cupola aperta.

All'inizio degli anni '90, Piero Salinari, chiamato ad Arcetri da Pacini, comincia a creare un piccolo gruppo di persone per lavorare al progetto. Questo piccolo gruppo si occuperà inizialmente del disegno della struttura meccanica del telescopio e dei processi di fabbricazione dei primari da 8m. Poco dopo però, il gruppo di Arcetri comincia a lavorare allo sviluppo di un sistema adattivo per il telescopio. Viene infatti riconosciuto da Angel e Salinari che per raggiungere

the Arcetri Observatory in the development of Adaptive Optics technology for the Large Binocular Telescope (LBT).

The Columbus project and LBT project

It was at the end of 1980s that Franco Pacini, Director of the Arcetri Observatory at the time, began collaborating with Prof. R. Angel from the University of Arizona to study an interferometric telescope made up of four different 8m class telescopes. The first sketch of this instrumentation is shown in Fig. 1.

The project included four telescopes (like the Very Large Telescope) was soon simplified to deal with the unit on the left alone, that with the binocular mount, which was to make the telescope famous all over the world. It should be noted that, right from the start, this unit was conceived as an interferometric unit capable of achieving angular resolutions dictated by the maximum distance between the edges of the two mirrors, which was about 23m in this case, giving a resolution of about six milliarseconds at visible wavelength. The name of the project was still Columbus but it was soon to change to the Large Binocular Telescope, or LBT. A drawing of this second version is shown in Fig. 2.

The telescope was then built like this. A photo from 2008 (Fig. 2, right) showing it, still lacking many instruments, inside the open dome.

At the beginning of the 1990s, Piero Salinari, called by Pacini to work at Arcetri, began

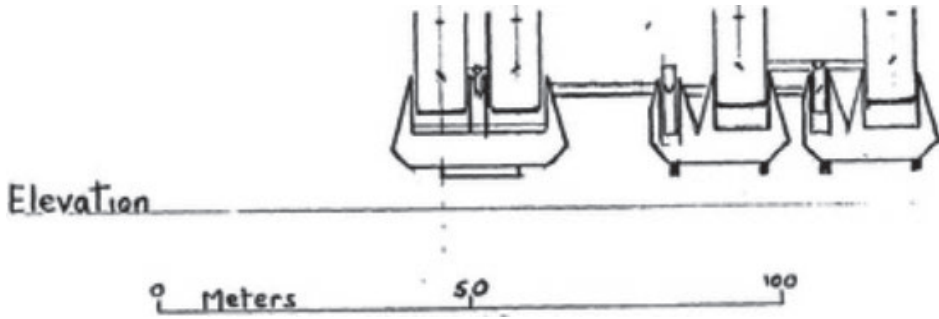


Figura 1. Schema concettuale del telescopio interferometrico Columbus alla fine degli anni 80 (crediti: S. Esposito).

Figure 1. A conceptual sketch of the Columbus interferometric telescope at the end of the 1980s (credits: S. Esposito).

le immagini interferometriche si deve necessariamente correggere il disturbo atmosferico e dunque sviluppare un sistema adattivo.

Il sistema adattivo di LBT: secondari adattivi e sensori a piramide

Il telescopio LBT è sicuramente un esempio di successo di una collaborazione internazionale di più partner. Qua in particolare ci occuperemo di riassumere brevemente l'attività svoltasi in Italia e ad Arcetri in particolare che ha portato allo sviluppo del sistema di ottica adattiva di LBT. Nella realizzazione di questo

setting up a small group to work on the design of the telescope's mechanical structure and the realization of the 8m primaries. Shortly afterwards, the Arcetri group began working on the

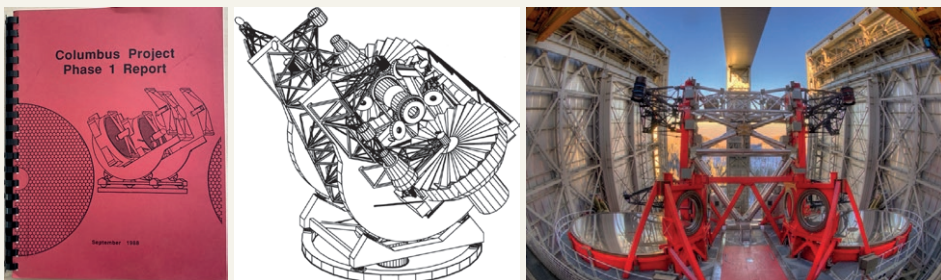


Figura 2. A sinistra: il *blue book* del telescopio LBT. Al centro: un disegno CAD del telescopio. Si noti la montatura binoculare che supporta i due specchi da 8m. A destra: una vista del telescopio LBT con i due primari da 8.4m e le due *prime focus camera red e blue* sviluppate dalla comunità astronomica italiana (crediti: Archivio OAA).

Figure 2. Left: the LBT "Blue book". Center: a CAD drawing of the telescope. Note the binocular mount that supports the two 8m mirrors. Right: a view of the LBT telescope with the two 8.4m primaries and the two prime focus cameras, red and blue, developed by the Italian astronomical community (credits: OAA Archives).

sistema la comunità italiana ha introdotto due nuove idee che oggi sono alla base di due componenti chiave di moltissimi dei sistemi adattivi attualmente in funzione o in fase di progetto: il secondario adattivo introdotto da Salinari nel 1994, e il sensore a piramide introdotto da Roberto Ragazzoni nel 1996.

I secondari adattivi

L'idea del secondario adattivo nasce naturalmente considerando la semplicità di utilizzo di un tale sistema rispetto ai normali correttori adattivi che richiedono ottiche complesse per essere accoppiati allo strumento e al telescopio a cui sono asserviti. Il concetto di funzionamento è semplice: si utilizza una lamina di vetro sottile (2mm di spessore) come specchio correttore e gli si dà la forma necessaria per il secondario richiesto per un dato telescopio. Sulla lamina sono attaccati alcuni magneti che tramite la forza esercitata su di essi da circuiti elettrici a bobina permettono di deformare la superficie riflettente a piacere.

Dal 1994 fino al 2003 ad Arcetri si è progredito con lo sviluppo di secondari adattivi passando attraverso vari prototipi il più importante dei quali è rappresentato in Fig. 3. Proprio questa notevole attività di R&D ha portato nel 2003 al completamento della realizzazione dell'unità del telescopio MMT di 600mm di diametro con 336 attuatori.

development of an adaptive optics system for the LBT telescope. Angel and Salinari immediately realized that, in order to reach the interferometric images, it was necessary to develop an adaptive system for the telescope in order to necessarily correct the atmospheric disturbance.

The Adaptive system of the LBT: adaptive secondaries and pyramid sensors

The LBT telescope is definitely a good example of a successful international collaboration between numerous partners. Here we deal particularly with resuming the activity that took place in Italy and at the Arcetri Observatory, which led to the development of the adaptive optics system for the LBT. In realizing this new system, the Italian community introduced two new ideas that are now the basis for two key components of many AO systems currently in operation or in the design phase: the adaptive secondary mirror technology introduced by Salinari in 1994 and the pyramid sensor introduced by Roberto Ragazzoni 1996.

Adaptive secondaries

The idea of an adaptive secondary comes naturally considering the simplicity of use of a similar system compared to normal adaptive correctors, which require complex relay optics to be coupled to the telescope and instrument they are serving. The functional concept is simple: a thin glass shell (2mm thick for the LBT) is used as the correcting mirror and is polished to give

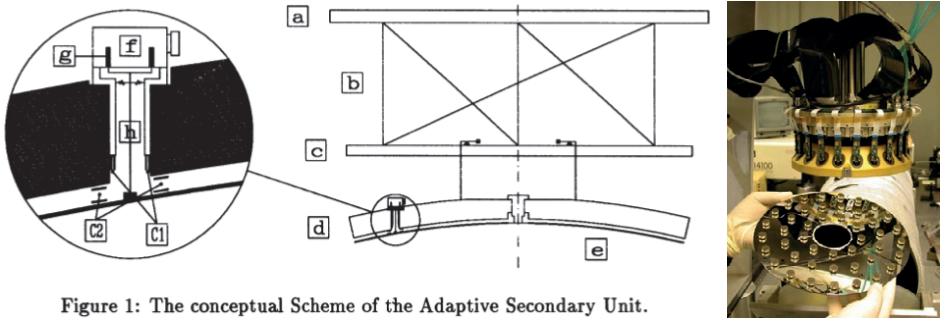


Figure 1: The conceptual Scheme of the Adaptive Secondary Unit.

Figura 3. A sinistra: schema concettuale del secondario adattivo in un articolo del 1994 di P. Salinari e collaboratori. A destra: foto del prototipo più importante (P30) che ha portato alla realizzazione dell'unità secondaria adattiva per il telescopio MMT installata con successo nel 2003 (crediti: SPIE, S. Esposito).

Figure 3. Left: conceptual sketch of the adaptive secondary unit in a paper by Salinari and collaborators dated 1994. Right: pictures of the most important prototype (P30) which led to the realization of the adaptive secondary unit for the MMT, successfully installed in 2003 (credits: SPIE, S. Esposito).

Il sensore a piramide: Padova e Firenze

Come riportato sopra, un innovativo tipo di sensore di fronte d'onda, altro componente fondamentale di moltissimi degli attuali sistemi adattivi, fu introdotto da Ragazzoni nel 1996. Questo sensore aveva alcuni vantaggi importanti rispetto al più correntemente utilizzato (al tempo!) sensore di Shack-Hartmann. In particolare, aveva una capacità di lavorare con stelle più deboli ed aveva (cosa scoperta in seguito) una sensibilità e quindi un'accuratezza maggiore nella mi-

it the right shape for the secondary mirror required of a given telescope. Permanent magnets are attached to the back of the shell and the electric force exerted on these by some electric coil circuits allow us to change the shape of the shell at will. The concept is shown in Fig. 3 (left).

From 1994 to 2003, work at Arcetri continued on the development of adaptive secondary mirrors via different prototypes, the most important one being shown in Fig. 3 (right). It was this extensive R&D activity that led, in 2003, to the completion of the realization of the adaptive secondary unit for the MMT telescope with a diameter of about 600 mm and 336 actuators.

The pyramid sensor: Padua and Florence

As mentioned above, an innovative type of wavefront sensor, another fundamental component of many of today's systems, was introduced by Ragazzoni in 1996. This sensor has some advantages with respect to the more commonly used (at the time!) Shack-Hartmann sensor. In particular, it has the ability to work with fainter stars and (something discovered later) it offers greater sensitivity and consequently greater accuracy in the measurement of wavefront disturbance because it benefits from the correction introduced by the AO system. One of the first pyramid sensors was built by the Padua group for installation in the adaptive optics system of the Galileo National Telescope (TNG).

In 1996, the Arcetri group began working with the sensor introduced by Ragazzoni, launching a collaboration between the two adaptive optics groups in Padua and Florence. This col-

sura del fronte d'onda perché beneficiava della correzione introdotta dal sistema adattivo. Uno dei primi esemplari di sensore a piramide fu costruito dal gruppo di Padova per essere installato sul sistema adattivo del Telescopio Nazionale Galileo (TNG).

È già nel 1996 che il gruppo di Arcetri si interessa al sensore introdotto da Ragazzoni e comincia così una collaborazione fra i due gruppi adattivi di Padova e Firenze che dura tutt'oggi e che ha contribuito molto allo sviluppo dell'ottica adattiva in Italia. Fra il 1997 e il 2000 nei laboratori di Arcetri si sviluppano prototipi di sensore a piramide e si partecipa allo stesso tempo al *commissioning* del sistema adattivo del TNG guadagnando così un'esperienza preziosa su questi sistemi e sul sensore a piramide in particolare.

Il disegno del sistema adattivo di LBT

È proprio sulla base dei risultati ottenuti negli anni 1996-2002 che nel 2002 viene presentato allo SPIE il sistema adattivo di LBT come composto da un secondario adattivo a 672 attuatori e 911mm di diametro e un sensore a piramide con 30'30 sotto-aperture. Sulla carta è il sistema più performante mai proposto fino ad ora. Vale la pena ricordare che un anno dopo, nel 2003, ci sarà la prima luce dell'unità secondario adattivo da 600mm per il telescopio MMT. È interessante notare come l'articolo del 2002 abbia 20 autori a riprova del fatto che il progetto era considerevolmente cresciuto di dimensioni.

laboration is still ongoing today and has made significant contributions to the development of adaptive optics in Italy. Between 1997 and 2000 in the Arcetri optical labs, the group developed some pyramid sensor prototypes, participating at the same time in the commissioning activities of the TNG adaptive optics system, gaining valuable experience in these systems and in the pyramid sensor in particular.

The LBT adaptive system design

Using the results achieved from 1996 to 2002 as the basis, in 2002, the Arcetri group presented the adaptive optics system of the LBT telescope, made up of an adaptive secondary unit with 672 actuators and a 911mm diameter, and a pyramid sensor with a 30x30 subaperture, at the SPIE conference. On paper, it was the most powerful system proposed to date. It is worth remembering that 2003 was the year of the first successful first light of the 600mm adaptive secondary unit for the MMT. Interestingly, the 2002 article had 20 authors, showing that the project had grown considerably in size.

Development, commissioning, and first on-sky results

The years between 2002 and 2009 were characterized by the development of the LBT adaptive optics system, which led to the installation of the system on the telescope at the be-

Sviluppo, *commissioning*, e primi risultati in cielo

Gli anni fra il 2002 ed il 2009 sono gli anni di sviluppo del sistema adattivo di LBT che porteranno poi alla installazione del sistema al telescopio all'inizio

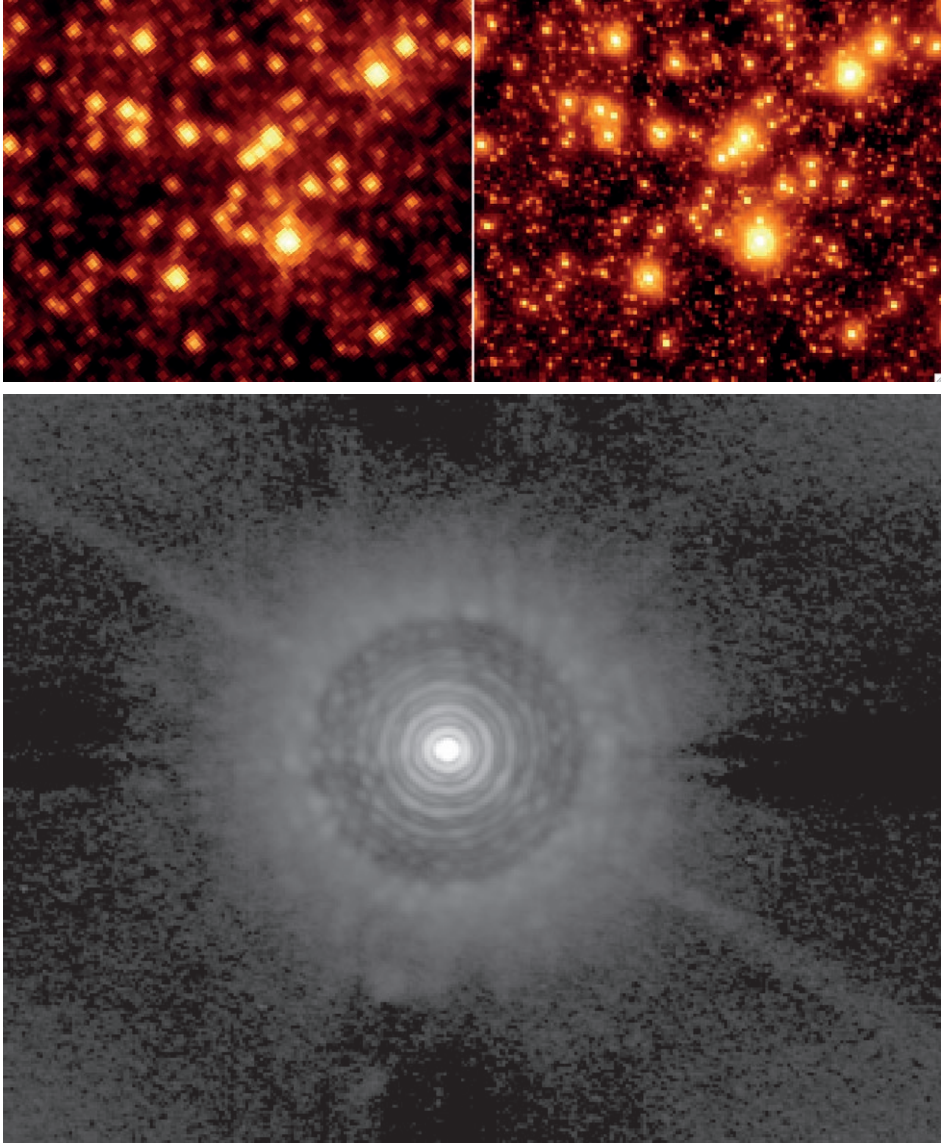


Figura 4. A sinistra: immagine in banda H dell'ammasso globulare M92 con HST (20min di integrazione). Al centro: con LBT (8 min di integrazione). A destra: immagine corretta di una sorgente uniforme in banda H con *Strehl ratio* maggiore dell'80%, risultato mai ottenuto prima da un sistema adattivo (crediti: S. Esposito).

Figure 4. Left: H-band image of globular cluster M92 with HST (20min integration). Center: with LBT (8 min integration). Right: corrected image for a point source star in H band with a Strehl ratio larger than 0.8, a result never achieved before by any AO system (credits: S. Esposito).

del 2010, dopo un *acceptance test* fatto ad Arcetri nel 2009. Ed è così che a fine maggio 2010 il sistema ha la sua prima luce in cielo funzionando perfettamente (!). Un paio di notti dopo il sistema ottiene immagini con un livello di correzione mai raggiunto prima per un telescopio basato a terra con *Strehl ratio* maggiore del 80% in banda H e contrasto maggiori di 10^{-4} a 300mas di distanza dal centro della *point spread function* (PSF). Il telescopio raggiunge immagini che sono migliori di quelle ottenute con HST come mostrato in Fig. 4. Infine, il sistema ottiene delle PSF corrette che aprono la strada all'uso di sistemi adattivi per l'*imaging* di pianeti extrasolari per il contrasto altissimo realizzato. L'immagine mostrata in Fig. 4 ha una correzione tale che si possono contare 8 anelli della figura di Airy.

Conclusion

Il gruppo di ottica adattiva dell'Osservatorio di Arcetri è internazionalmente riconosciuto come uno dei gruppi di riferimento nel campo delle ottiche adattive e lo deve agli sviluppi fatti fra il 1996 ed il 2010 ed ai risultati ottenuti con il sistema di ottica adattiva di LBT. Oggi moltissimi fra i sistemi più avanzati esistenti o in fase di progettazione si basano su (a) specchi deformabili a tecnologia adattiva e su (b) sensori a piramide per le applicazioni adattive ad alto contrasto. Questi sono i due componenti chiave realizzati e utilizzati con successo dal gruppo di Arcetri nel sistema adattivo di LBT. Proprio per questo oggi il gruppo partecipa

ginning of 2010, after the performance of an acceptance test at Arcetri in 2009. At the end of May 2010, the system had its first light on sky and it worked as expected right from the beginning (!). A couple of nights later, the systems obtained images with a correction level that had never been reached before with a ground-based telescope, with a Strehl ratio above 0.8 in H band and contrast better than 10^{-4} at 300 milliarcseconds from the center of the point spread function (PSF). The telescope obtained images that were better of those obtained with HST like that of M92 shown in Fig. 4. Finally, the system achieved some corrected PSF that opened the road to the use of the adaptive optics system for high contrast imaging and extra-solar planet searches. The quality of the image shown in Fig. 4 (right) is so high that we can count eight diffraction rings in the Airy's figure.

Conclusions

The Arcetri adaptive optics group is internationally recognized as one of the reference groups in the field of adaptive optics. This is due to the developments achieved between 1996 and 2012 and to the results achieved with the adaptive optics system of the LBT. Many of the most advanced AO systems that exist today or are in the design phase feature (a) deformable mirrors using adaptive technology and (b) pyramid wavefront sensors for the high contrast adaptive applications. These are the two key components realized and used successfully by the Arcetri group in the adaptive system of the LBT telescope. It is due to this success that the

con ruoli importanti un gran numero di progetti inclusi quelli relativi al disegno e realizzazione degli strumenti per gli Extremely Large Telescopes del futuro.

Possiamo dire che tutta questa attività è scaturita dalla visione innovativa e dalla convinzione di alcune persone chiave che ci piace ricordare ancora una volta ovvero Franco Pacini e Piero Salinari. A nome del gruppo adattivo di Arcetri grazie ancora ad entrambi!

Simone Esposito è Dirigente di Ricerca all'INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri. Dal 2010 è il responsabile del gruppo di ottiche adattive dell'Osservatorio di Arcetri che oggi include 20 persone. È stato PI del sistema adattivo sviluppato per LBT (2002-2013) e PI/CoI di numerosi progetti di ottica adattiva.

Arcetri group now participates with important roles in a large number of important projects, including those related to the design and realization of instrumentation for the Extremely Large Telescopes of the future.

We can say that all this activity was triggered by the innovative vision and determination of a few key people who we would like to mention one more time - Franco Pacini and Piero Salinari. On behalf of the Arcetri AO group, thank you both!

Simone Esposito is Head of Research at the INAF-Arcetri Astrophysical Observatory. He has been the head of the adaptive optics group at the Arcetri Observatory, which now includes 20 people, since 2010. He was PI of the adaptive system developed for LBT (2002-2013) and PI/CoI of several adaptive optics projects.